黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究

武玉萍[1],付红安[1],王佳佳[2],田帅[1],刘鹏飞[1],孙清[2]

(1. 宁夏宁电电力设计有限公司,750001 银川;2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院,710054 西安)

摘　要:为了明确黄土地基微型桩水平承载力对上部结构安全性能的影响,本研究基于黄土地基微型桩现场静载试验,研究了桩长、桩径、桩身弹性模量及桩间距对微型桩水平承载力的影响;分析了沿基础深度的桩身水平位移和弯矩变化规律。并结合有限元分析了桩间距对群桩水平承载力的影响。研究结果表明:黄土地基微型桩基础弯矩较大的位置距桩顶 $4d \sim 5d$;桩径对微型桩水平承载力的影响较大,而桩长超过 $33d \sim 35d$ 后对其水平承载力的影响较小;当桩间距达到 $8d$ 时,可以不考虑群桩效应对群桩水平承载力的影响。上述研究成果为微型桩在黄土地基中的应用提供了参考。

关键词:微型桩;黄土地基;现场静载试验;水平承载特性;群桩效应

中图分类号:TU473　　**文献标志码:**A

Horizontal bearing capacity and pile group effect of micro-pile on loess ground

WU Yuping[1],FU Hong'an[1],WANG Jiajia[2],TIAN Shuai[1],LIU Pengfei[1],SUN Qing[2]

(1. Ningxia Ningdian Power Design Institute CO.,LTD.,750001 Yinchuan,China;
2. School of Human Settlements and Civil Engineering,Xi'an Jiaotong University,710054 Xi'an,China)

Abstract: In order to clarify the influence of horizontal bearing capacity of micro-piles on superstructure safety performance,the effects of pile length,pile diameter,pile elastic modulus and pile spacing on horizontal bearing capacity of micro-pile on loess foundation are studied based on in-situ static load test. The variation of pile displacement and bending moment along the foundation depth under different horizontal loads are analyzed. And the influence of pile spacing on the horizontal bearing capacity of pile groups is analyzed with the aid of the verified finite element model. The results show that the position of the greater bending moment of micro-pile foundation on loess soil is about $4d$-$5d$ from pile top. The pile diameter has a greater impact on the horizontal bearing capacity of the micro-pile,but the influence is relatively small when the pile length exceeds the optimal pile length ($33d$-$35d$). When the pile spacing reaches $8d$,the influence of the pile group effect on the horizontal bearing capacity of the pile group can be ignored. The above research results provide some reference for the application of micro-pile on loess foundation.

Key words: micro-pile;loess foundation;site static test;horizontal bearing characteristic;pile group effect

---

收稿日期:2021-11-30　　**修回日期:**2022-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51978570)

通信作者:王佳佳。E-mail:wjj970226@stu.xjtu.edu.cn

引用格式:武玉萍,付红安,王佳佳,等. 黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究[J]. 应用力学学报,2022,39(3):543-553.

WU Yuping,FU Hongan,WANG Jiajia,et al. Horizontal bearing capacity and pile group effect of micro-pile on loess ground[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(3):543-553.

微型桩是在树根桩基础上发展起来的一种新型小直径钻孔灌注桩。直径小于400 mm,长细比通常大于30。微型桩基础施工机具轻便,节约材料用量,经济环保,基础施工对地基土扰动范围小,避免大范围开方回填所引起的塌陷、浸水软化等后期工程地质问题。微型桩充分利用原状土的承载特性,承载力高[1-2]。目前微型桩广泛应用于基础托换加固[3-4]、古建筑物加固纠偏、边坡支护[5-8]及滑坡治理[9-12]等领域。一方面,随着“西电东送”工程的实施,输电线路必然逐步覆盖西部山地、高原等黄土地区。山地机械化施工是目前输电线路基础发展的瓶颈,而微型桩基础是一种能够适应黄土地区输电线路基础应用特点的新型经济环保基础。近年来,相比于传统的杆塔基础,微型桩在软土地基输电线路杆塔基础中得到广泛应用[13-16],而在黄土地基的研究还不够充分,应用较少[17]。另一方面,微型桩基础除承受竖向荷载外,还承受由于风、地震、设备运动、结构扭转等引起的水平荷载。目前,国内外学者对于黄土地基微型桩的水平承载性能研究较少,而其水平承载力对于上部结构的安全至关重要。因此,开展黄土地基微型桩基础水平承载性能的研究十分必要。

微型桩长细比较大,在水平荷载作用下,微型桩下段可视为嵌固于土中而不能转动,桩顶部主要有桩顶自由和嵌固两种约束,如图1所示。微型桩桩径较小,桩的抗弯刚度小,侧面受荷土体面积也较小,桩身主要发生挠曲变形,上部桩周土体变形较大,导致水平荷载不能有效地沿桩身传递到较深土层,使微型桩桩顶在较小的水平荷载作用下便产生较大的位移,难以满足实际工程的位移控制要求[18]。而在黄土地区,其湿陷性也会对微型桩承载性能产生一定影响[19]。为了改善微型桩基础水平承载性能差的情况,自20世纪50年代以来,国内外学者通过现场试验及理论分析对微型桩水平承载特性展开了研究。Rothbauer 等[20]进行了微型桩水平承载力的现场载荷试验,认为在靠近桩上部2 ~5 m的地方水平承载力对土的类型和强度敏感。陈正等[21-22]利用ABAQUS有限元软件分析了微型桩水平承载力的影响因素,结果表明竣工后桩基础中分担竖向荷载较大的桩,其抵抗水平荷载的能力较强。Ahmed 等[23]对空心杆微型桩的侧向特性进行了现场试验和数值模拟,得出在适当的配筋配置和桩顶固定条件下,微桩能够承受中等水平荷载。张奎等[24]对微型桩进行了室内试验,结果表明微型桩的水平承载力与饱和度呈反比、与桩径呈正比关系,并且二次非线性回归函数比一次线性函数能较好地吻合试验结果。Incheol 等[25]利用有限元分析方法考虑了微型桩的倾角和间距对其水平承载性能的影响,得到了其在倾斜工况下的负载分担率。王开阳等[26]通过大比例模型槽试验发现相比传统一次注浆,二次注浆型钢花管微型桩单桩水平承载力可提高24.42%。孔德森等[27]建立了淤泥质土单桩基础数值分析模型,研究水平对称循环荷载下桩身内外壁土抗力的分布规律,研究表明:桩身内壁土抗力沿桩环向呈先增加后减小交替分布;桩身外壁被动土压力减小,而主动土压力增大。综上所述,国内外学者对微型桩水平承载性能的研究多集中于软土地区,对黄土地基微型桩水平承载性能和群桩效应研究相对较少,微型桩在黄土地区的设计应用缺乏理论依据。

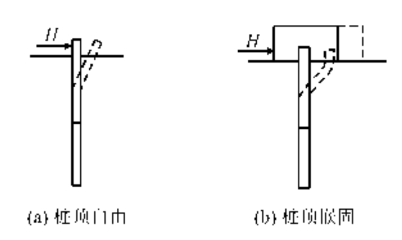


图1　微型桩水平受荷

Fig. 1　Horizontal load of micro-pile

为了研究微型桩基础在黄土地基的水平承载性能,本研究基于特高压工程微桩基础深化应用研究,开展了黄土地基微型桩现场静载试验。分析了不同桩长、桩径、桩身弹性模量及桩间距对微型桩的水平承载力的影响,并建立了微型桩基础有限元模型,通过与现场静载试验结果进行对比,验证了有限元模型的合理性,进而分析桩间距对群桩水平承载力的影响,为微型桩在黄土地基中的应用提供了依据。

1　试验概况

1.1　设计参数

试验场地位于陕西省兴平市,该场地地势平坦,

地层结构简单,试验土层主要是第四系中更新统风积黄土。通过现场土工试验测得地质特征参数如表1所示,场地黄土的压实度为98.3%。

现场水平试验包括11根单桩,分别考虑桩长、桩径及桩身弹性模量对单桩水平承载力的影响。群桩共5组,分别考虑桩间距、桩数及斜桩对群桩水平承载力的影响,具体试验工况见表2。群桩Q1、Q2、Q3、Q4、Q5承台尺寸分别为1 550 mm×1 550 mm×600 mm、1 700 mm×1 700 mm×600 mm、2 000 mm×2 000 mm×600 mm、1 700 mm×1 700 mm×600 mm、2 600 mm×2 600 mm×600 mm,群桩桩顶嵌入承台10 cm。群桩Q4中有2根直桩、2根斜桩,斜桩倾角为10°,具体布置见图2。微型桩单桩及群桩基桩均为钻孔灌注桩,试桩主筋采用8Φ16。

表1 试验场地土体参数

Tab. 1 Soil parameters of the test site

土层	ρ/(kN·m^{-3})	ω/%	c/kPa	φ/(°)	E_s/MPa	δ_s
黄土(0~9 m)	16.1	22.9	12.9	17.2	5.38	0.047
古土壤(9~16 m)	17.1	20.7	16.0	18.0	6.69	0.035

表2 试验工况

Tab. 2 Test classification

桩号	桩长/m	桩径/mm	桩身弹性模量/GPa	桩间距	桩数	试验工况
D1	4	300	28			水平
D2	6	300	28			水平
D3	8	300	28			水平
D4	10	300	28			水平
D5	20	300	28			水平
D6	8	200	28			水平
D7	8	250	28			水平
D8	8	350	28			水平
D9	8	300	30			水平
D10	8	300	32			水平
D11	8	300	34			水平
Q1	8	300	28	2.5d	2×2	水平
Q2	8	300	28	3d	2×2	水平
Q3	8	300	28	4d	2×2	水平
Q4	8	300	28	3d	2×2	水平
Q5	8	300	28	3d	3×3	水平

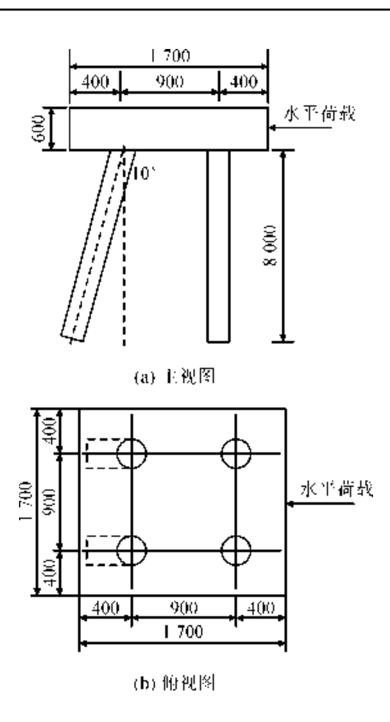


图2 群桩Q4平面布置图(单位:mm)

Fig. 2 Arrangement of pile group Q4 (unit:mm)

1.2 反力及加载方案

现场水平静载试验采用千斤顶施加水平力,千斤顶置于反力桩和微型桩之间。在千斤顶与试桩接触处安置球形铰座,以保证千斤顶作用力能水平通过桩身轴线。水平反力装置及现场试验装置如图3所示,群桩平面布置如图4所示。

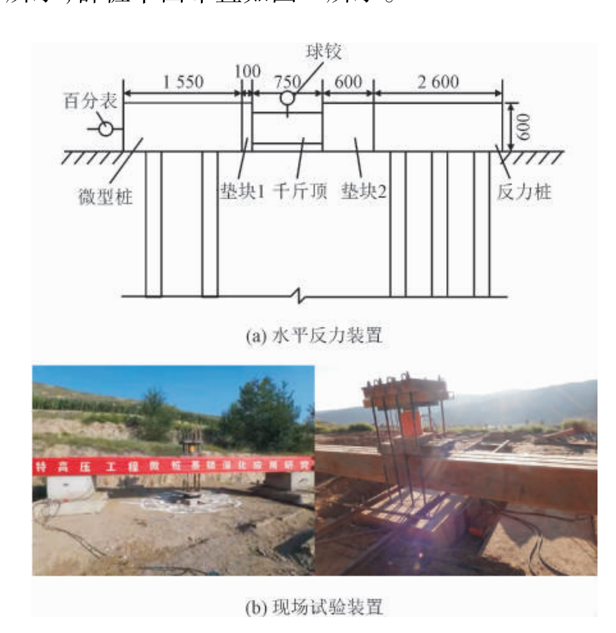


图3 微型桩水平试验反力装置

Fig. 3 The reaction force device formicro-pile horizontal test

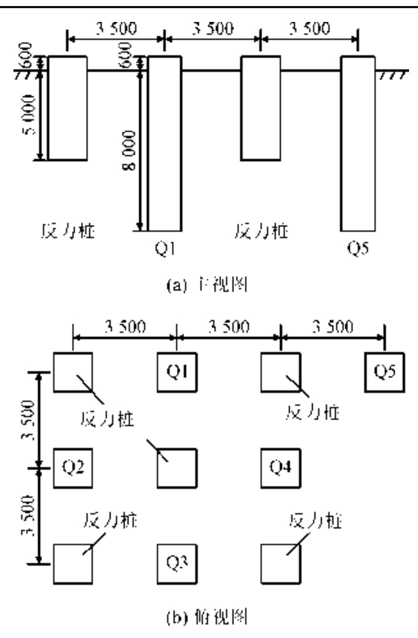


图 4　群桩平面布置图(单位:mm)

Fig. 4　Arrangement of pile group (unit:mm)

加载方案参照《架空送电线路基础设计技术规定》DL/T5219－2005 有关规定,采用慢速维持荷载法进行分级加载。分级荷载为最大加载量或预估极限承载力的 1/10,其中第一级取分级荷载的 2 倍,待试桩位移相对稳定时,施加下一级荷载。其中,试桩位移相对稳定标准为每 1 h 内的桩顶位移量不超过 0.1 mm,并连续出现 2 次。若出现桩身折断,或者水平位移超过 30～40 mm,再或者水平位移达到设计要求的水平位移容许值时,终止试验。

2　单桩水平试验结果及分析

绘制荷载-位移(Q-s)曲线,根据桩基规范,当荷载-位移曲线呈缓变型时,位移量应超过设计要求,考虑输电线路杆塔设计时一般要求基础水平允许位移不大于 10 mm,试验选取位移量达到 10 mm 的荷载作为水平极限承载力。表 3 给出了微型桩单桩水平承载力试验结果。

表 3　单桩水平承载力试验结果

Tab. 3　Test result of horizontal bearing capacity of pile

桩号	桩长/m	桩径/mm	桩身弹性模量/GPa	水平承载力/kN	水平位移/mm	桩柔度系数
D1	4	300	28	57.8	10	2.2×10^{-3}
D2	6	300	28	61.1	10	4.3×10^{-4}
D3	8	300	28	61.7	10	1.4×10^{-4}
D4	10	300	28	62.1	10	5.6×10^{-5}
D5	20	300	28	61.5	10	3.5×10^{-6}
D6	8	200	28	33.2	10	2.7×10^{-5}
D7	8	250	28	45.2	10	6.6×10^{-5}
D8	8	350	28	79.7	10	2.5×10^{-4}
D9	8	300	30	66.3	10	1.4×10^{-4}
D10	8	300	32	69.5	10	1.5×10^{-4}
D11	8	300	34	70.8	10	1.6×10^{-4}

根据表 3 可知,微型桩的自身刚度很小,桩的柔度系数[28]计算值较小,侧向受力桩主要是桩周土失效引起的土体发生局部破坏。

2.1　桩长对单桩水平承载力的影响

随着荷载的增加,微型桩 Q-s 曲线呈抛物线型增长。当荷载较小时,桩土处于弹性阶段;随着荷载增加,桩土开始由弹性过渡到弹塑性变形阶段,桩身发生侧移,桩侧土从地表自上而下出现屈服,桩截面的抗矩也逐渐发展来抵抗水平荷载,桩土趋于极限状态,直至土体失稳,微型桩破坏。

图 5 为桩长对微型桩水平承载性能的影响曲线。由图 5 可知,随着桩长增加,微型桩的水平承载力增加。桩长从 4 m 增加至 6 m、8 m、10 m 时,其水平承载力的增幅分别是 5.7%、1.0%、0.6%。而桩长由 10 m 增加到 20 m 时,其水平承载力减小了 0.9%。可见,桩长在 4～10 m 范围内增加时,微型桩水平承载力增加,但增幅不断减小;而桩长由 10 m 增加到 20 m 时,微型桩水平承载力有所减小,说明微型桩桩长与浅层土体抗力的发挥存在最优关系。

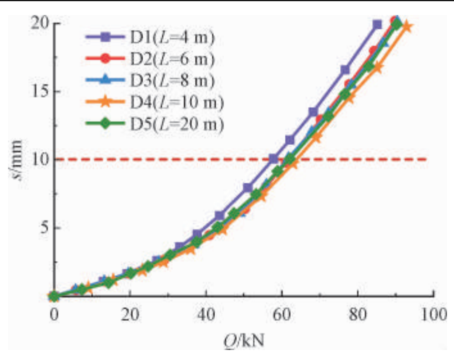


图 5 桩长对微型桩水平承载性能的影响

Fig. 5 Influence of pile length on horizontal bearing capacity of micro-pile

2.2 桩径对单桩水平承载力的影响

图 6 为桩径对微型桩水平承载性能的影响曲线。由图 6 可知,随着桩径增加,桩的水平承载力增加。桩径从 200 mm 增加至 250 mm、300 mm、350 mm 时,微型桩水平承载力的增幅分别是 36.1%、36.5%、29.2%。增大桩径本质上提高了桩身的抗弯刚度。相比于桩长,增加桩径对提高微型桩水平承载力的作用更大。

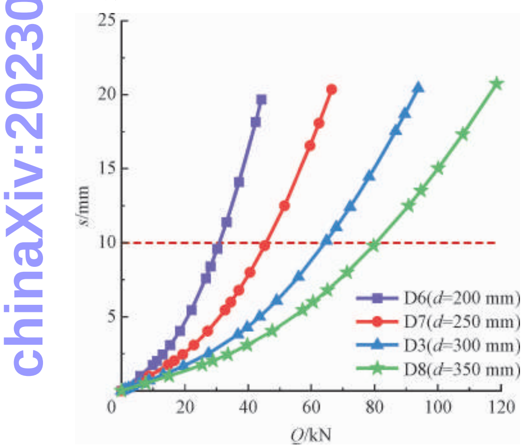


图 6 桩径对微型桩水平承载性能的影响

Fig. 6 Influence of pile diameter on horizontal bearing capacity of micro-pile

2.3 桩身弹性模量对单桩水平承载力的影响

图 7 为桩身弹性模量对微型桩水平承载性能的影响曲线。由图 7 可知,微型桩的水平承载能力随着弹性模量的增大而提高。桩身弹性模量从 28 GPa 增加到 30 GPa、30 GPa 到 32 GPa、32 GPa 到 34 GPa 时,微型桩水平承载力的增加幅度分别是 7.5%、4.8%、1.9%。与桩径相比,桩身弹性模量对微型桩水平承载能力的影响较小,尤其是当微型桩处于弹性变形阶段。

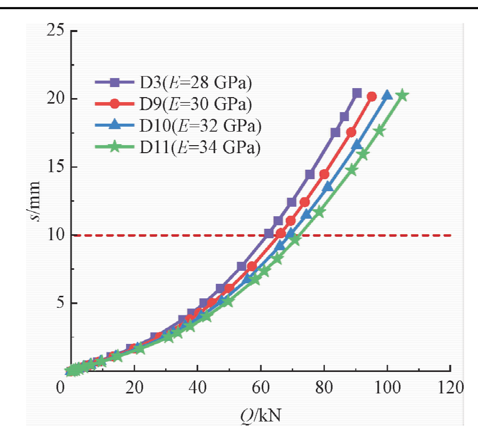


图 7 桩身弹性模量对微型桩水平承载力的影响

Fig. 7 Influence of pile elastic modulus on horizontal bearing capacity of micro-pile

2.4 单桩水平承载力量纲归一化分析

对不同桩长对应的水平承载力进行量纲归一化处理,横坐标为 4 m、6 m、8 m、10 m、20 m 与 4 m 的比值,纵坐标为 4 m、6 m、8 m、10 m、20 m 分别对应的水平承载力与 4 m 的水平承载力的比值,桩径和桩身弹性模量也做相同的量纲归一化处理,见图 8。

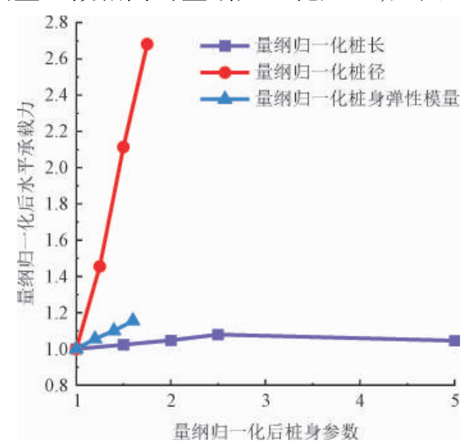


图 8 量纲归一化后桩身参数与水平承载力的关系

Fig. 8 The relationship between normalized pile parameters and horizontal bearing capacity

由图 8 可以看出,桩身参数不同对微型桩水平承载性能的影响也不同,桩径与水平承载力的关系曲线拟合后斜率为 2.3,相对于桩身弹性模量、桩长与水平承载力关系曲线拟合后的斜率 0.25、0.05 来说最大。增大桩径对其水平承载力的提高作用较显著,桩身弹性模量次之,桩长影响较小。主要因为微型桩在承受水平荷载过程中,桩的抗弯刚度 EI 及浅层土抗力发挥了主要作用,而对于桩本身来说桩径及桩身弹性模量与桩的抗弯刚度 EI 密切相关。因此,桩长及桩身弹性模量对微型桩水平承载力影响

较大。而仅仅增加桩长对水平承载力的提高作用较小,桩长从 10 m 增加至 20 m,其水平承载力变化不到 1 kN。此工况下桩长超过 33d~35d 时,增加桩长对水平承载力的提高作用不大。

3　群桩水平试验结果及分析

3.1　群桩水平试验 Q-s 曲线分析

图 9 为群桩水平试验荷载-位移(Q-s)曲线,随着荷载增加,群桩 Q-s 曲线也呈抛物线型增长,曲线大致可分为弹性阶段、弹塑性过渡阶段及塑性破坏阶段。由图 9 可知,群桩 Q1、Q2、Q3 在水平荷载作用下,桩间距从 2.5d 增加至 3d、4d,其水平承载力从 138.1 kN 增至 156.2 kN、188.9 kN,增幅 13.1%、36.8%。增加桩间距会提升群桩水平承载力。主要因为群桩在水平荷载作用下,桩与桩之间通过桩间土发生相互影响,出现土中应力叠加的现象,产生水平承载力的群桩效应。当群桩桩间距过小时,桩间地基土因桩位移产生松弛,所能提供的侧向土体抗力较小,因此,桩间距较小的群桩水平承载力会相对较小。

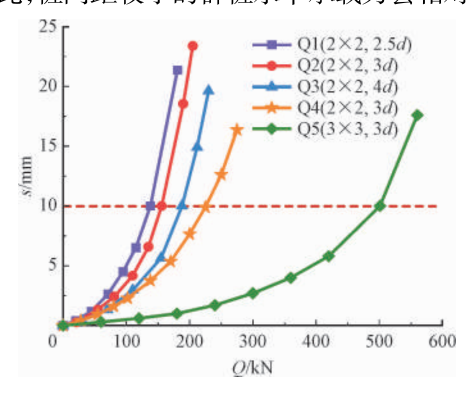


图 9　群桩现场水平试验 Q-s 曲线

Fig. 9　The Q-s curve of field horizontal test of pile groups

对比群桩 Q2、Q4 试验结果,基桩由直桩变为斜桩,其水平承载力从 156.2 kN 增至 225.6 kN,增幅 44.4%。斜桩的存在会提高微型桩的水平承载力。这是因为相比于直桩,斜桩在承受水平荷载时,作用力会分为沿桩径和桩身两个方向的力,而桩承受轴向荷载的能力远大于径向荷载的能力。因此斜桩基础可以充分发挥其轴向荷载的承载能力,显著提高抵抗侧向荷载的能力。

对比 Q2 和 Q5,基桩桩数从 2×2 增加至 3×3,其水平承载力从 156.2 kN 增至 501.4 kN,增幅 221.0%。基桩桩数增加,微型桩群桩水平承载力会得到显著增加。这是因为增加基桩桩数,群桩截面总的抗弯刚度增加,桩间地基土所能提供的侧向土体抗力也随之增加。因此,群桩水平承载力会随着基桩桩数的增加而得到显著提高。

3.2　群桩与单桩水平承载力对比分析

群桩在承受水平荷载时,荷载通过承台传递至各基桩,使桩前土体形成受压区。受压区重叠会使前桩承担更多的荷载,同一加载条件下,前排基桩承载力低于单桩,表现为"群桩效应"。由图 10 可知,群桩 Q1~Q4 的水平承载力并不等于单桩 D3 水平承载力的 4 倍,存在明显的群桩效应。通过引进群桩水平效应系数这个物理量来作为分析桩间距对群桩影响的判断标准,群桩效应系数越大,表明群桩中基桩之间的影响越小。群桩水平效应系数[29]计算如式(1)所示。

$$\eta = \frac{H_g}{nH_s} \tag{1}$$

其中:η 为群桩水平效应系数;H_g 为群桩水平承载力;H_s 为基桩水平承载力;n 为基桩数。

群桩 Q1~Q4 的群桩水平效应系数分别为 0.58、0.61、0.72、0.91。可见,桩间距是影响群桩水平效应系数的主要因素,也是影响群桩水平承载力的主要因素。因此,得出可以忽略群桩效应的桩间距对其水平承载性能的研究至关重要。

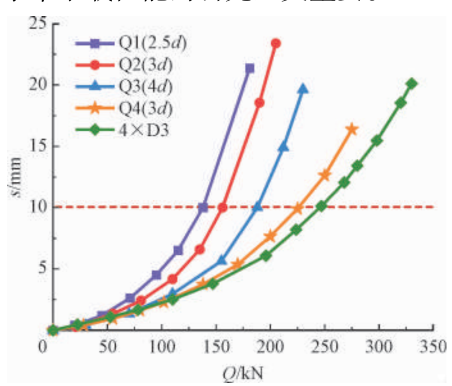


图 10　单桩与群桩现场水平试验 Q-s 曲线

Fig. 10　The Q-s curve of field horizontal test of pile and pile group

4　微型桩水平承载特性数值分析

根据微型桩现场试验结果分析,一方面,除了研究桩身参数对其水平承载力的影响外,桩身侧移对其水平承载性能的研究也十分重要。由于沿桩身方

向不同深度处的位移难以测量,特借助数值模拟就桩身参数对不同深度处的桩身位移进行研究。另一方面,群桩水平承载力存在明显的群桩效应,而桩间距是影响群桩效应的主要因素,但现场试验存在一定的局限性,因此利用数值模拟对影响微型桩群桩效应的桩间距进行分析。

4.1 有限元模型

根据单桩现场试验进行单桩有限元模型的建立;取桩长 8 m,桩径 300 mm 的基桩来建立 2×2 群桩有限元模型,有限元模型编号与试验编号一致。利用有限元软件 ABAQUS 对黄土地基微型桩基础进行水平荷载的施加,采用线弹性模型模拟微型桩,Mohr-Coulomb 模型模拟土的弹塑性行为。具体桩土模型参数见表 4。

表 4 桩土模型参数

Tab. 4 Pile-soil model parameters

项目	ρ/(kN·m^{-3})	E/MPa	μ	c/kPa	ϕ/(°)
土	16.1	20	0.35	12.9	17.2
桩	24	28 000	0.3		

为了消除边界条件对计算结果的影响,在建模时,土体水平范围取为微型桩直径的 20 倍,土体竖向范围取为微型桩埋入深度的 3 倍。基于现场试验,对土体底部设置固定端约束使桩周土边界节点不发生平动和转动,土体侧面水平两个方向的平移自由度约束,如图 11 所示。

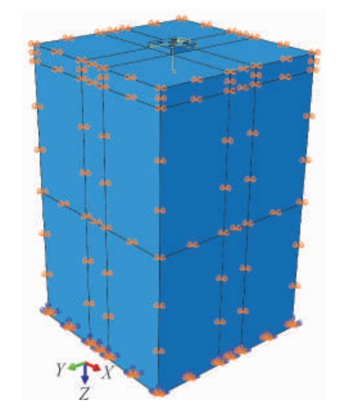


图 11 边界条件示意

Fig. 11 Schematic diagram of boundary conditions

对于微型桩这种摩擦桩进行数值模拟时,面面离散法[30]能更好地模拟桩土之间的接触关系。主从面的选取也会影响计算结果的收敛性,此时主控面取刚度较大的桩面,土体接触面为从面,且网格划分更精细。接触面设置主要有法向和切向两部分,法向采用硬接触模块"Hard Contact",这种接触对于两个物体来说只有在压紧的状态下才会传递法向压力,并且保证限制住了穿透现象的发生;切向作用采用"Penalty"罚函数,允许发生弹性滑移变形,且设定摩擦系数"Friction Coeff"为 0.4。模型采用三维八节点的缩减积分单元(C3D8R)进行网格划分(见图 12),桩土接触部分网格划分较密,以保证计算精度。在桩顶耦合一点 RP-1 进行水平荷载施加,见图 11。

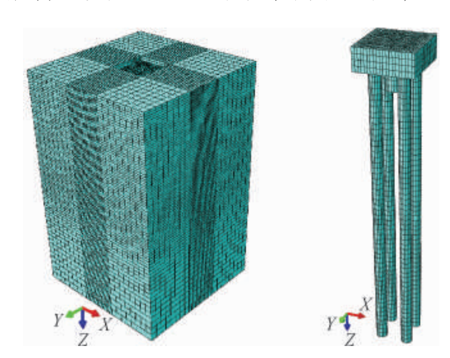


图 12 有限元模型网格划分(左为桩周土体,右为桩)

Fig. 12 Mesh division of finite element model (left is the soil around the pile, right is the pile)

4.2 有限元模型验证

取桩顶水平位移达到 10 mm 时对应的荷载大小作为微型桩基础的水平承载力。图 13(a)、图 13(b)分别为单桩 D2、群桩 Q2 在水平荷载下现场试验与数值模拟的 Q-s 曲线对比。由图 13 可知,数值模拟与试验结果吻合良好,从而验证了有限元模型的准确性和可行性。因此,可采用数值模拟就微型桩水平承载性能的影响进行分析。

4.3 单桩水平承载特性分析

图 14(a)、图 14(b)分别为微型桩 D3 在不同水平荷载作用下的桩身位移和弯矩分布。由图 14(a)可知,微型桩在水平荷载作用下桩身的转动或挠曲会引起水平位移,桩顶水平位移出现最大值,随着深度的增加,位移迅速减小。随着水平荷载的增加,桩身不同深度处的水平位移变化幅度不同,并且位移随深度减小的速率也有明显提高。水平荷载作用下桩身出现的反向挠曲致使桩身有两个水平位移零点:第一个位移零点出现在深度 2.5 m 附近,第二个位移零点出现在深度 6 m 附近。由图 14(b)可知,桩身弯矩随着水平荷载增大而增大,且桩身弯矩最大值出现的位置也在不断下移,但其下移量逐渐减小,其桩身弯矩最大值稳定在 $4d \sim 5d$ 之间。

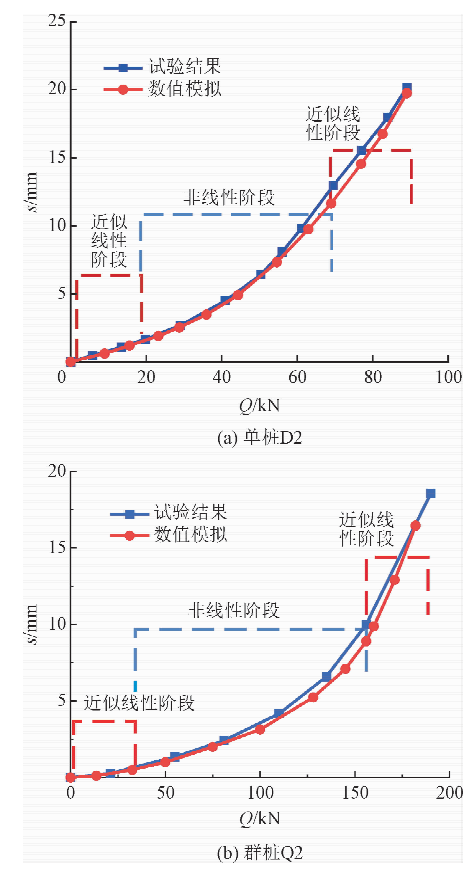


图 13　水平 Q-s 现场试验与数值模拟结果对比

Fig. 13　Comparison of horizontal Q-s field test and numerical simulation results

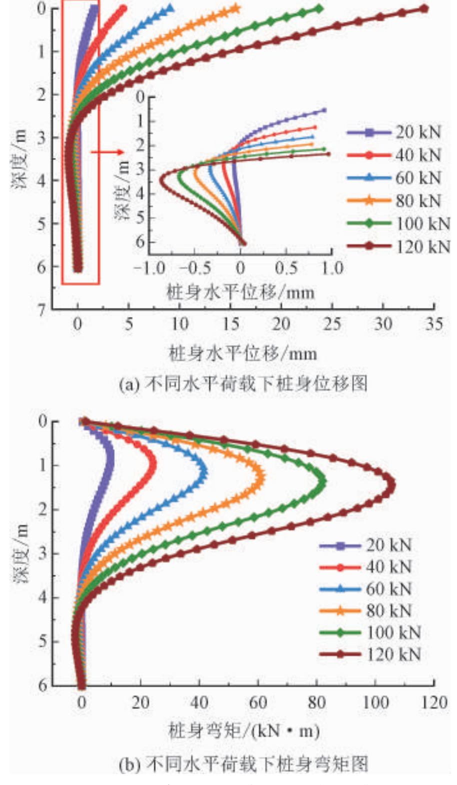


图 14　单桩 D3 水平承载性能

Fig. 14　The pile D3 horizontal bearing performance

4.4　桩身参数对桩身侧移的影响

图 15 分别是水平荷载为 60 kN 时，微型桩桩长、桩径、桩身弹性模量对其水平位移的影响曲线。

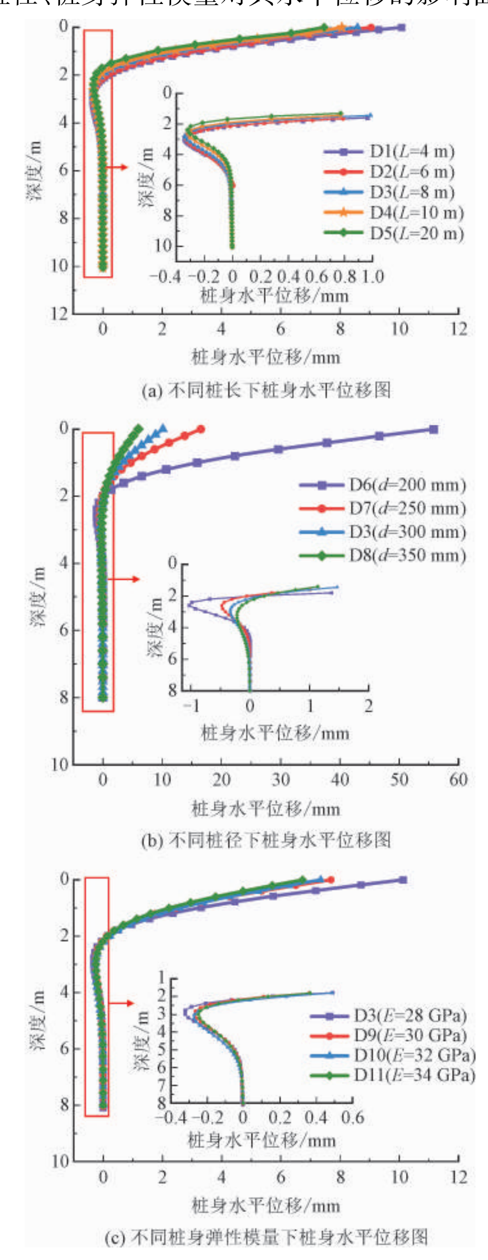


图 15　桩身参数对桩身水平位移的影响($H=60$ kN)

Fig. 15　Influence of pile body parameters on pile body horizontal displacement ($H=60$ kN)

由图 15 可知，随着桩身参数数值增加，桩顶水平位移不断减小，但位移减小幅度较小。桩身位移零点基本稳定在 2.5 m 和 6 m 深度处。距桩顶 2 m 深度范围内桩深水平位移较大，桩身 4 m 以下水平位移基本为 0。桩径对于微型桩水平位移影响较大，而桩长及桩身弹性模量对桩身水平位移影响较小。可见，微型桩水平承载性能的发挥由浅层土体

和桩截面刚度决定,增加桩径可以提高微型桩的抗侧移能力,仅增加桩长或桩身弹性模量对其水平承载力的提高作用有限。

4.5 群桩水平承载性能分析

图 16 分别为群桩 Q2 前排及后排桩在不同水平荷载作用下的桩身位移和弯矩分布图。由图 16 可知,群桩的桩身水平位移和弯矩曲线变化规律与单桩大致相同。

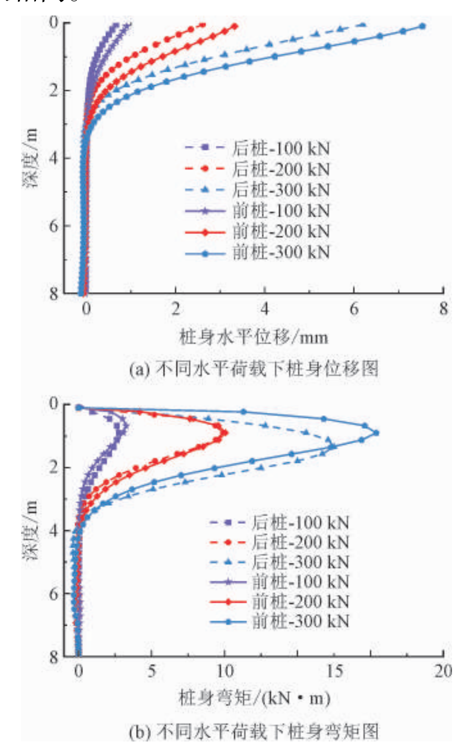


图 16 群桩 Q2 水平承载性能

Fig. 16 The pile group Q2 horizontal bearing performance

由图 16(a)可知,基桩在水平荷载作用下,桩顶水平位移出现最大值,随着深度的增加,位移迅速减小。同一水平荷载下,前桩的桩身水平位移会大于后桩。水平荷载作用下前桩、后桩桩身出现的反向挠曲致使桩身有 2 个水平位移零点,前桩及后桩位移零点出现的位置相差很小。由图 16(b)可知,桩身弯矩随着水平荷载增大而增大,且桩身弯矩最大值出现的位置也在不断下移,其桩身弯矩最大值稳定在 $4d \sim 5d$ 之间。前桩弯矩大于后桩,桩身 4 m 以下弯矩基本为零,说明桩土应力和应变互有显著影响的范围发生在桩身的上部,弯矩变化率较大,而桩体下部弯矩较小,且随荷载的增加基本保持沿桩身呈线性分布。而前桩与后桩水平受力性能不同,主要是因为水平荷载通过承台分配给各微型桩基桩,沿着水平荷载作用方向,前桩分配到的水平荷载较大,后桩较小,后桩的桩前地基土因前桩位移产生松弛,同一深度处,前桩的桩前地基土所能提供的侧向土体抗力要大于后桩,导致前桩与后桩的桩身水平位移及弯矩不同。而在松散砂土中,微型桩水平弯矩最大值一般出现桩中部,靠近中间的基桩弯矩较边缘基桩更小[31]。

4.6 桩间距对群桩水平承载性能的影响

根据群桩模拟结果(见表 5),分析了不同桩间距下群桩水平承载性能的变化情况。图 17 为不同桩间距条件下微型群桩水平效应系数的分布规律。由图 17 可知,随着桩间距的逐渐增大,群桩的群桩效应系数也逐渐增大,表明群桩中各基桩的相互影响越来越小。桩间距由 $2d$ 增加到 $6d$ 时,群桩水平效应系数曲线呈线性增长,其效应系数由 0.51 增加至 0.93。桩间距由 $6d$ 增加到 $8d$ 时,曲线增长斜率不断减小。桩间距超过 $8d$ 以后,群桩水平效应系数几乎不变。由此可见,对于承受水平荷载的微型群桩,当桩间距达到 $8d$ 时,可以基本不考虑群桩效应对其水平承载力的影响。

表 5 群桩水平承载力数值结果

Tab. 5 Numerical results of horizontal bearing capacity of pile groups

桩长/m	桩径/mm	桩间距	桩数	水平承载力/kN	水平位移/mm
8	300	$2d$	2×2	123.5	10
8	300	$3d$	2×2	155.6	10
8	300	$4d$	2×2	187.7	10
8	300	$5d$	2×2	212.2	10
8	300	$6d$	2×2	229.7	10
8	300	$7d$	2×2	234.7	10
8	300	$8d$	2×2	237.1	10
8	300	$9d$	2×2	237.9	10

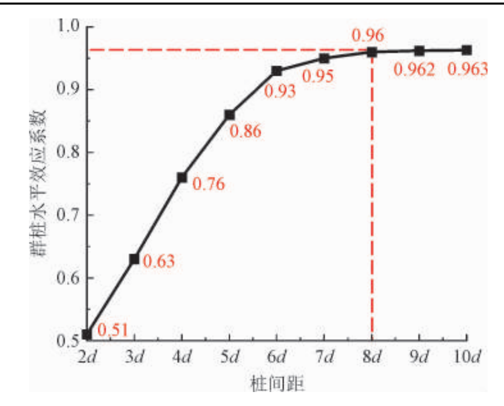


图 17 桩间距对群桩水平效应系数的影响

Fig. 17 The influence of pile spacing on the horizontal effect coefficient of pile groups

5 结　论

通过试验研究及数值模拟分析,研究了黄土地基上微型单桩、群桩基础水平承载性能及其影响因素。基于试验及数值模拟结果得到以下结论。

1)黄土地基微型桩基础在水平荷载作用下,其弯矩较大的位置距桩顶 $4d \sim 5d$,工程设计中可考虑加强此范围。微型桩桩长与浅层土体强度的发挥存在最优关系,桩长超过 $33d \sim 35d$ 后增加桩长对其水平承载力影响不大。

2)随着微型桩桩长、桩径及桩身弹性模量数值增加,桩的水平承载力增加,而桩顶水平位移不断减小。其中,桩径对水平承载力的提升及对桩顶水平位移的减小作用较桩身弹性模量、桩长更为显著。

3)群桩在承受水平荷载时,前桩受力大于后桩,群桩效应显著,桩间距是影响群桩水平效应系数的主要因素。对于黄土地基微型群桩,当桩间距达到 $8d$ 时,可不考虑群桩效应。

参考文献

[1] BRUCE D A, DIMILIO A F, JURAN I. A primer on micropiles[J]. Civil engineering, 1995, 65(12): 51-54.

[2] 吕凡任,陈云敏,梅英宝. 小桩研究现状和展望[J]. 工业建筑, 2003, 33(4): 34-38.
LÜ Fanren, CHEN Yunmin, MEI Yingbao. Research status and prospect of small pile[J]. Industrial construction, 2003, 33 (4): 34-38(in Chinese).

[3] SHELKEA A, PATRA N R. Effect of arching on uplift capacity of single piles[J]. Geotechnical and geological engineering, 2009, 27 (4): 365-377.

[4] 曹明星,高永涛,周喻. 基于树根桩地基加固法的井塔纠偏方案[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51 (10): 2906-2916.
CAO Mingxing, GAO Yongtao, ZHOU Yu. Method of well tower deviation correction based on root pile foundation reinforcement method[J]. Journal of Central South University(science and technology), 2020, 51 (10): 2906-2916(in Chinese).

[5] HE Hui, LIU Yanbing. Analysis of numerical simulation of micropiles reinforcing shallow landslide [J]. Advanced materials research, 2012, 1615: 2663-2666.

[6] 武志信,吴红刚,赖天文,等. 微型桩加固土质边坡的动土压力响应及其频谱特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40 (10): 3909-3919.
WU Zhixin, WU Honggang, LAI Tianwen, et al. Study on dynamic earth pressure response and spectrum characteristics of soil slope strengthened by micro-pile[J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40 (10): 3909-3919(in Chinese).

[7] 胡富贵,巢万里,冯龙健. 基于极限抗力的微型单桩加固边坡承载失效模式研究[J]. 公路, 2020, 65(4): 12-18.
HU Fugui, CHAO Wanli, FENG Longjian. Study on bearing failure mode of slope reinforced by mini-pile based on ultimate resistance [J]. Highway, 2020, 65(4): 12-18(in Chinese).

[8] DEENDAYAL R, MUTHUKKUMARAN K, SITHARAM T G. Analysis of laterally loaded group of piles located on sloping ground [J]. International journal of geotechnical engineering, 2020, 14 (5): 580-588.

[9] ZHANG Zhichao, CHEN Yumin, LIU Hanlong. Numerical investigation on the impact resistance of road barriers of micropile-MSE wall for subgrade [J]. Computers and geotechnics, 2017, 82: 249-265.

[10] 李楠,门玉明,汪班桥,等. 微型桩群桩支护均质土滑坡的振动台模型试验[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1371-1378.
LI Nan, MEN Yuming, WANG Banqiao, et al. Shaking table model test of homogeneous soil landslide supported by micro-pile group [J]. Journal of engineering geology, 2019, 27 (6): 1371-1378(in Chinese).

[11] 陈再谦,帅世杰,蒲黍條,等. 微型抗滑桩极限抗弯承载力试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2019, 41(5): 59-66.
CHEN Zaiqian, SHUAI Shijie, PU Shuwan, et al. Experimental study on the ultimate flexural bearing capacity of miniature anti-sliding piles[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2019, 41(5): 59-66 (in Chinese).

[12] 王祥. 微型桩在高速铁路滑坡治理中的设计和应用[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 1922-1929.
WANG Xiang. Design and application of micro piles in high-speed railway landslide control[J]. Journal of railway engineering, 2021, 38(2): 1922-1929 (in Chinese).

[13] 鲁先龙,程永锋. 我国输电线路工程现状和展望[J]. 电力建设, 2005, 26(11): 25-27.
LU Xianlong, CHENG Yongfeng. Current situation and prospect of power transmission line engineering in China[J]. Power construction, 2005, 26(11): 25-27 (in Chinese).

[14] 屈勇. 输电线路微型桩基础承载性能的数值模拟[J]. 电力建设, 2011, 32(2): 59-61.
QU Yong. Numerical simulation of bearing performance of transmission line mini-pile foundation [J]. Electric power construction, 2011, 32(2): 59-61(in Chinese).

[15] 周勇发,蔡兴杰,龚健. 软土地基中杆塔微型桩基础的设计方法研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊1): 532-536.
ZHOU Yongfa, CAI Xingjie, GONG Jian. Research on design method of pole tower micro-pile foundation in soft soil foundation[J]. Industrial construction, 2005, 35(S1): 532-536(in Chinese).

[16] 吕凡任,陈仁朋,陈云敏,等. 软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 99-105.
LÜ Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Experimental study on compressive and pull-out characteristics of micro-pile on soft soil[J]. Chinese journal of civil engineering, 2005, 38(3): 99-

105(in Chinese).

[17] 苏荣臻,杨文智. 黄土地基微型桩杆塔基础施工工艺[J]. 电力建设,2013,34(8):121-124.
SU Rongzhen, YANG Wenzhi. Construction technology of loess foundation micro pile tower foundation[J]. Electric power construction,2013,34(8):121-124 (in Chinese).

[18] 程永锋. 微型桩基础在输电线路工程中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

[19] 屈伟,朱锐,居俊,等. 黄土地区微型桩基础承载特性现场试验研究[J]. 建筑科学,2020,36(1):98-105.
QU Wei,ZHU Rui,JU Jun,et al. Field test study on bearing characteristics of micro-pile foundation in loess area[J]. Architectural science and technology,2020,36(1):98-105(in Chinese).

[20] ROTHBAUER M J,RICHARDS JR T D. Lateral loads on pin piles (micropiles)[C]//Proceedings of the 2004 Geosupport Conference. Orlando,Florida:Geotechnical Special Publication,2004.

[21] 陈正,刘宇,梅国雄. 既有竖向荷载对微型桩水平承载特性的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2011,32(1):101-106.
CHEN Zheng,LIU Yu,MEI Guoxiong. Influence of existing vertical load on horizontal bearing characteristics of mini-pile[J]. Journal of Nanjing University of Technology (natural science),2011,32(1):101-106(in Chinese).

[22] 陈正,梅岭,梅国雄. 柔性微型桩水平承载力数值模拟[J]. 岩土力学,2011,7(6):2219-2224.
CHEN Zheng, MEI Ling, MEI Guoxiong. Numerical simulation of horizontal bearing capacity of flexible micro-pile[J]. Rock and soil mechanics,2011,7(6):2219-2224(in Chinese).

[23] ELAZIZ A Y A,NAGGAR M H E. Performance of hollow bar micropiles under monotonic and cyclic lateral loads[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2015, 141(5):04015010.

[24] 张奎,韩晓雷. 黄土地层微型桩水平承载力研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47 (5):694-700.
ZHANG Kui,HAN Xiaolei. Research on horizontal bearing capacity of micro-pile in loess layer[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (natural science edition),2015,47(5):694-700(in Chinese).

[25] DONGHO K,GARAM K,INCHEOL K,et al. Assessment of load sharing behavior for micropiled rafts installed with inclined condition[J]. Engineering structures,2018,172(1):780-788.

[26] 王开洋,李亚军,李果,等. 二次注浆竖向钢花管微型桩水平承载能力试验研究[J]. 岩土力学与工程学报,2019,38(8):1707-1717.
WANG Kaiyang, LI Yajun, LI Guo, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of vertical steel tube micro-pile with secondary grouting[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(8):1707-1717(in Chinese).

[27] 孔德森,刘一,邓美旭,等. 海上风电单桩基础周围非均质土体横向土抗力分布特性研究[J]. 应用力学学报,2021,38(3):943-949.
KONG Desen,LIU Yi,DENG Meixu,et al. Research on the lateral soil resistance distribution characteristics of the heterogeneous soil around the single pile foundation of offshore wind power[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(3):943-949(in Chinese).

[28] TAKAAKI K,LELAND M K. Lateral load-deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings[J]. Soils and foundations,1980,20(4):19-36.

[29] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ 94-2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[30] 朱以文,蔡元奇,徐晗. ABAQUS 与岩土工程分析[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.

[31] MASHHOUD H J,YIN J H,PANAH A K,et al. A 1-g shaking table investigation on response of a micropile system to earthquake excitation[J]. Acta geotechnica,2020,15(4):827-846.

(编辑　李坤璐)

(上接第 542 页)

[23] HU Yanzhi,LI Xiao,ZHANG Zhaobing,et al. Numerical modeling of complex hydraulic fracture networks based on the discontinuous deformation analysis (DDA) method[J]. Energy exploration & exploitation,2021,39(5):1640-1665.

[24] NIE Wen,ZHAO Zhiye,NING Youjun,et al. Development of rock bolt elements in two-dimensional discontinuous deformation analysis [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2014, 47(6): 2157-2170.

[25] NIE Wen,ZHAO Zhiye,NING Youjun,et al. Numerical studies on rockbolts mechanism using 2D discontinuous deformation analysis [J]. Tunnelling and underground space technology, 2014, 41: 223-233.

[26] MAShuqi,ZHAO Zhiye,NIE Wen,et al. A numerical model of fully grouted bolts considering the tri-linear shear bond-slip model[J]. Tunnelling and underground space technology,2016,54:73-80.

[27] 王文. 考虑块体内耦合作用及锚杆塑性效应的非连续变形分析方法[D]. 济南:山东大学,2014.

[28] YOKOTA Y,ZHAO Zhiye,NIE Wen,et al. Experimental and numerical study on the interface behaviour between the rock bolt and bond material[J]. Rock mechanics and rock engineering,2019,52(3):869-879.

[29] NING Youjun,YANG Jun,AN Xinmei,et al. Modelling rock fracturing and blast-induced rock mass failure via advanced discretisation within the discontinuous deformation analysis framework[J]. Computers and geotechnics,2011,38(1):40-49.

[30] NI Kesong,YANG Jun,NING Youjun,et al. A modified sub-block DDA fracturing modelling method for rock[J]. Engineering analysis with boundary elements,2020,111:154-166.

(编辑　李坤璐)